

## Déposition de nanostructures magnétiques par lithographie atomique : une simulation semi-classique

E. Jurdik, F. Bentivegna, A.V. Petukhov, W. Leo Meerts, T. Rasing  
et H. van Kempen

Research Institute for Materials, University of Nijmegen, Toernooiveld 1,  
6525 ED Nijmegen, The Netherlands

**Résumé :** Les trajectoires d'atomes neutres en interaction quasi-résonante avec un rayonnement laser stationnaire sont calculées numériquement selon une approximation semi-classique, afin de simuler la déposition de nanostructures par lithographie atomique. Cette approche intuitive se prête également à la mise en œuvre d'un modèle stochastique de diffusion surfacique des atomes sur leur substrat.

La fabrication de structures de taille nanométrique est d'un intérêt, tant fondamental que pratique, croissant. L'effort se porte essentiellement vers le développement de techniques lithographiques à haute résolution et massivement parallèles. Récemment, la lithographie atomique s'est affirmée comme un moyen d'inscrire directement un réseau périodique de nanostructures avec une résolution potentielle très élevée, de quelque 10 nm. Ici, la limite de diffraction est plus basse qu'en lithographie optique classique, la longueur d'onde de de Broglie d'atomes thermiques étant très courte, et cette technique permet une approche massivement parallèle de la fabrication de nanostructures. Des jets de sodium [1], de chrome [2, 3], de césium [4] ou d'aluminium [5], préalablement collimatés par refroidissement laser [6], ont ainsi été focalisés par une onde stationnaire pour former des structures nanométriques. Cependant, d'importants efforts sont encore à fournir pour déposer, par cette technique, des atomes mieux adaptés aux applications, par exemple pour l'enregistrement magnétique de données.

La lithographie atomique tire parti de l'interaction quasi-résonante entre atomes et rayonnement laser. En principe, deux types de forces sont exercées par la lumière sur des atomes. La force *dipolaire* naît de l'interaction entre le moment dipolaire induit, au sein de l'atome, par la lumière, et le gradient d'intensité de cette même lumière. La force *spontanée*, elle, est due à une succession de cycles de fluorescence.

Simuler numériquement la focalisation d'atomes neutres par une onde laser stationnaire est un moyen de mieux cerner la technique de lithographie atomique. Différents traitements sont possibles, de la simple analogie avec l'optique géométrique jusqu'à l'emploi d'algorithmes quantiques de type Monte-Carlo. Notre approche se base sur une méthode semi-classique de tracé des trajectoires atomiques (fig. 1). Elle a l'avantage d'être intuitive et de donner par là-même une vision simple de l'importance de chacun des paramètres physiques impliqués. D'un autre côté, elle se prête aisément à la mise en œuvre d'un algorithme simple de diffusion surfacique en temps réel.

La position et les vitesses transversale et longitudinale initiales des atomes sont aléatoirement générées selon leur loi de distribution propre. Les trajectoires des atomes

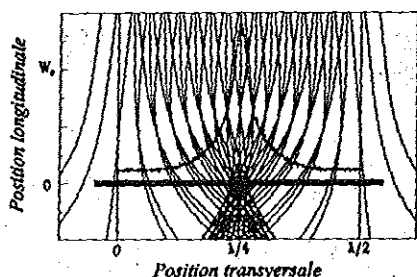


Figure 1 : Trajectoires atomiques et profil de la structure pour un jet thermique (1800 K) de Cr de divergence 0,1 mrad.  $P = 35$  mW,  $\Delta = 200$  MHz,  $w_0 = 100$   $\mu$ m et  $\lambda = 425,55$  nm.

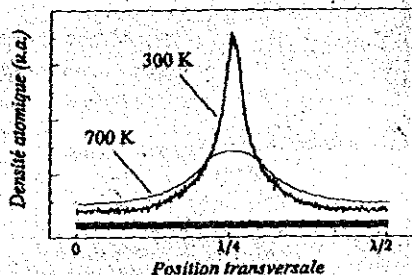


Figure 2 : Effet de la diffusion surfacique pendant la déposition, pour deux différentes températures de surface  $T_s$ .

soumis à un pseudo-potential semi-classique [7] sont alors calculées par résolution numérique de l'équation de leur mouvement selon la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre. Lorsque l'atome atteint le substrat, il peut encore changer de position selon un mécanisme stochastique de diffusion basé sur un modèle "gravitationnel" [8], les liaisons entre atomes pouvant être brisées par activation thermique.

Ce modèle simple permet plusieurs conclusions sur le rôle des paramètres physiques impliqués. Ainsi, c'est la divergence *transversale* du jet atomique qui limite essentiellement la résolution des structures déposées. La dispersion des *vélocités longitudinales*, elle, est l'analogue de l'aberration chromatique d'une lentille, mais son effet est plus faible que la limite de diffraction des atomes, estimée à quelques nanomètres. Un autre paramètre d'importance est le désaccord de fréquence  $\Delta$  entre le rayonnement laser et la transition atomique. En général, plus  $\Delta$  est élevé, meilleur est le contraste de la structure. Cependant, la puissance lumineuse  $P$  nécessaire à la bonne focalisation des atomes croît aussi avec  $\Delta$ . Enfin, plus le *waist*  $w_0$  du faisceau laser supposé gaussien est réduit, meilleure est la résolution.

L'élargissement des nanostructures dû à la diffusion surfacique est essentiellement déterminé par le rapport entre les taux de diffusion des atomes (qui dépendent de la température du substrat  $T_s$ ) et leur vitesse de déposition (fig. 2). La valeur de ces taux de diffusion est relativement conjecturale, ce qui rend délicate toute conclusion quantitative, mais ce modèle rend bien compte qualitativement du rôle de la diffusion surfacique sur la forme des structures déposées.

## Références

- [1] Timp G. et al., *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 1636-1639.
- [2] McClelland J.J. et al., *Science* **262** (1993) 877-880.
- [3] Drodofsky et al., *Microelectronic Engineering* **35** (1997) 285-288.
- [4] Lison F. et al., *Appl. Phys.* **65** (1997) 419-422.
- [5] McGowan R.W. et al., *Optics Letters* **20** (1995) 2535-2537.
- [6] Voir n° spécial "Laser cooling and trapping of atoms", *J. Opt. Soc. Am. B* **6** (1989) 2020-2226.
- [7] Gordon J.P., Ashkin A., *Phys. Rev. A* **21** (1980) 1606-1617.
- [8] Tamborenea P.I., Das Sarma S., *Phys. Rev. E* **48** (1993) 2575-2594.